



VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství

**Zvyšování modulu pružnosti betonu s použitím mdroby jako  
hrubého drceného kameniva**

**Increasing of concrete elastic modulus using moravian greywacke  
as coarse grinded aggregate**

Studentka:  
Vedoucí bakalářské práce:

Denisa Gracová  
Ing. Jiří Šafrata



**Prohlášení studenta:**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě.....

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická universita Ostrava ( dále jen VŠB – TUO ) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3 )
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé bakalářské práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy ( až do jejich skutečné výše ).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě .....

### **Poděkování**

Chtěla bych poděkovat svému konzultantovi Ing. Jiřímu Šafratovi za ochotu a cenné rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat všem pracovníkům laboratoře VŠB – TUO Ostrava.

## **Anotace**

V této práci je zpracován vliv moravské droby jako hrubého drceného kameniva na modul pružnosti betonu. Modul pružnosti má významný vliv na přetvárné vlastnosti betonových konstrukcí.

V experimentální části práce byly pevnost betonu v tlaku, statický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti zjišťovány na betonech s odlišnými recepturami a výsledky byly vyjádřeny pomocí grafů. Z těchto byly odečteny hodnoty pro porovnání s hodnotami udávanými normou ČSN EN 1992 -2 – Eurokód 2.

## **Annotation**

There is analyzed influence of moravian greywacke as coarse grinded aggregate on concrete elastic modulus. Concrete elastic modulus plays significant role on deformation properties of concrete structures.

The experimental work was part of the compressive strength of concrete, static elastic modulus and dynamic elastic modulus measured on concrete with different recipes and the results were expressed using graphs.

These readings were compared with values for the indicated standard ČSN EN 1992 -2 - Eurocode second.

## **Obsah**

Obsah.....	7
Seznam použitých symbolů.....	9
1 Úvod .....	11
2 Složky betonu.....	12
3 Kamenivo.....	13
3.1 Droba.....	13
3.2 Čedič.....	14
3.3 Tovačov.....	15
3.4 Objemová hmotnost kameniva.....	16
3.5 Sítový rozbor kameniva.....	19
4 Cement.....	25
5 Voda.....	25
6 Přísady.....	26
7 Příměsi.....	27
8 Čerstvý beton.....	28
8.1 Návrh složení betonu.....	28
8.2 Zpracování čerstvého betonu.....	32
8.3 Zkouška konzistence čerstvého betonu.....	32
8.4 Stanovení množství vzduchu v betonu a objemová hmotnost betonu.....	34
9 Pevnost betonu v tlaku.....	36
10 Modul pružnosti betonu.....	42
10.1 Dynamický modul pružnosti betonu.....	42
10.2 Statický modul pružnosti betonu.....	49

10.3 Srovnání statického a dynamického modulu pružnosti.....	52
11 Závěr.....	53
Seznam použité literatury.....	54
Internetové odkazy.....	54
Seznam obrázků.....	55
Seznam grafů.....	56
Seznam tabulek.....	57

### Seznam použitých symbolů

$t$	teplota prostředí	[ °C ]
$w$	vlhkost prostředí	[ % ]
$E$	modul pružnosti	[ GPa ]
$m_a$	hmotnost nasyceného povrchově osušeného kameniva	[ g ]
$m_b$	celková hmotnost kameniva, pyknometru a vody	[ g ]
$m_c$	celková hmotnost pyknometru s vodou	[ g ]
$m_d$	hmotnost vysušeného vzorku	[ g ]
$\rho_{ps}$	objemová hmotnost nasyceného povrchově osušeného kameniva	[ Mg*m <sup>-3</sup> ]
$\rho_{po}$	objemová hmotnost vysušeného kameniva	[ Mg*m <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	hustota vody	[ Mg*m <sup>-3</sup> ]
$\rho$	objemová hmotnost	[ kg*m <sup>-3</sup> ]
$d_1, d_2$	max. rozměry rozlitého betonu ve dvou na sebe kolmých směrech	[ mm ]
$m$	hmotnost	[ kg ]
$V$	objem	[ m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	výpočtová pevnost betonu v tlaku	[ MPa ]
$f_{ck}$	charakteristická pevnost betonu v tlaku	[ MPa ]
$F$	síla, při které došlo k porušení vzorku	[ kN ]
$A$	plocha	[ mm <sup>2</sup> ]
$a$	šířka krychle	[ mm ]
$b$	délka krychle	[ mm ]
$h$	výška krychle	[ mm ]
$v$	výška válce	[ mm ]



$d$	průměr válce	[ mm ]
$v_L$	impulzní rychlost podélného UZ vlnění	[ m*s <sup>-1</sup> ]
$k$	součinitel rovnoměrnosti prostředí	[ - ]
$E_C$	statický modul pružnosti	[ GPa ]
$E_{BU}$	dynamický modul pružnosti	[ GPa ]
$\Delta\sigma$	rozdíl napětí	[ MPa ]
$\Delta\varepsilon$	rozdíl poměrného přetvoření	[ mm ]
$\sigma_a$	horní zatěžovací napětí	[ MPa ]
$\sigma_b$	základní zatěžovací napětí	[ MPa ]
$\varepsilon_a$	průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí	[ mm ]
$\varepsilon_b$	průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí	[ mm ]

## 1. Úvod

Jednou ze základních veličin charakterizujících beton je modul pružnosti. Modul pružnosti se značí  $E$  a uvádí se v GPa. Pro betony nabývá hodnot od 27 GPa do 44 GPa. Tato veličina ovlivňuje výrazným způsobem přetvárné vlastnosti betonových konstrukcí. Její hodnoty jsou důležité zejména pro konstrukce mostů, hal a střech s velkými rozpory a pro další náročné inženýrské konstrukce, protože u takových konstrukcí jsou důležité i malé průhyby a další deformace. Čím větší je hodnota modulu pružnosti, tím menší jsou deformace a naopak. S rostoucím modulem pružnosti tedy klesají deformace a průhyby betonových konstrukcí. S rostoucím zatížením, rozponem a s rostoucí statickou náročností konstrukce narůstá význam modulu pružnosti.

Pro statické výpočty se počítá s normovými hodnotami modulů pružnosti, které jsou odvozené od pevnostních tříd betonu. Tyto hodnoty jsou pouze teoretické a nemusí odpovídat reálným hodnotám, kterých dosáhneme při výstavbě betonových konstrukcí. A to protože v dnešní době máme spoustu možností, jak navrhnout složení betonu. Při návrhu složení betonu musíme počítat s požadovanou pevností. Dále bereme v potaz konzistenci čerstvého betonu, maximální zrno kameniva, agresivitu prostředí, požadovanou rychlost tuhnutí, roční období apod. Všechny tyto technologické požadavky mají vliv na druh, třídu a množství cementu, druh kameniva a volbu přísad. Díky všem těmto vlivům můžeme vyrobit betony se stejnou požadovanou pevností, které se budou lišit v dalších vlastnostech, mezi něž patří i modul pružnosti. Proto je důležité u konstrukcí, které jsou náročné na deformace, předepsat do projektu i hodnotu požadovaného modulu pružnosti betonu a nespoléhat se na normové hodnoty, odvozené od pevností betonu v tlaku.

Tato práce se zabývá zkoumáním závislosti modulu pružnosti na složení betonu.

## **2. Složky betonu**

Základní složky betonu jsou kamenivo, cement a voda. Dále se do betonu přidávají přísady a příměsi. Beton je stavební látka sestávající ze dvou fází. Z kameniva, které plní funkci plniva a z hydratované maltoviny s póry, která plní funkci pojiva. Jako pojivo se nejčastěji používá cement, ale můžeme také použít vápno, polymery, bitumeny. Beton má dlouhou trvanlivost, je křehký a vlastnosti betonu jsou závislé na čase. Vlastnosti betonu nemůžeme přesně definovat, jelikož záleží na složení a technologii betonu, cementový kámen a kamenivo nejsou homogenní materiály. Jednotlivá zrna kameniva jsou vždy uspořádána jiným způsobem, jednotlivé složky betonu dávkujeme s ohledem na stanovené tolerance. Pevnost betonu je nižší, než pevnost použitého kameniva a pevnost cementového kamene. Důvodem je rozhraní dvou fází, kdy dochází ke styku povrchu kameniva s cementovým kamenem a pórovitost cementového kamene.

### **3. Kamenivo**

Kamenivo tvoří nejvýznamnější část objemu betonu. V betonu má vytvořit pevnou kostru, která bude mít co nejmenší mezerovitost. Z tohoto důvodu se kamenivo skládá se zrn různých velikostí ve vhodném poměru. „ Kamenivo je přírodní nebo umělé, převážně anorganická, zrnitá látka určená pro stavební účely do velikosti zrna do 125 mm.“ [ 1 ] Kamenivo dělíme dle původu, velikosti maximálního zrna, vzniku a objemové hmotnosti. Dle vzniku máme kamenivo drcené a těžené. Drcené kamenivo získáváme při těžbě kamene v lomu. Jeho hlavním znakem je, že má ostré hrany, které vznikly drcením v drtiči. Těžené kamenivo vzniká přirozeným rozpadem hornin - zvětráváním. Jeho hlavním znakem je, že nemá ostré hrany, ty se zaoblily při transportu zvětralé horniny ( vítr, voda ). Dle velikosti maximálního zrna máme kamenivo hrubé se zrny o velikosti 4 – 125 mm, nazývané také štěrk, drť. Drobné kamenivo se zrny o velikosti do 4 mm, nazývané také písek. Jemné kamenivo se zrnky o velikosti do 0,25 nebo 0,125 mm, nazývané také moučka, filer. Štěrkopísek, který se skládá z přírodního těžného hrubého a drobného kameniva a štěrkodrt', která se skládá z drceného přírodního hrubého a drobného kameniva. Dle objemové hmotnosti dělíme kamenivo na pórovité, hutné a těžké.

#### **3.1 Droba**

Droba je hornina sedimentární, řadí se mezi klastické sedimenty (obr. 3.1.1, obr. 3.1.2). Je složená především z úlomků dříve existujících hornin a jejich minerálů ( křemene a živce ). Pro bližší klasifikaci droby je důležitá velikost úlomků, z kterých se skládá. Převážná část zrn je o velikosti od 0,063 - 2 mm, proto se dále řadí mezi psamity. Ložiska droby z velké míry vytvářejí vrstvy o rozloze několika km<sup>2</sup> a tloušťce okolo 1 m. Střídají se většinou s břidlicemi.



Obrázek 3.1.1 – mdroba frakce 8-16



Obrázek 3.1.2 – mdroba frakce 4-8

Moravská droba nebo tzv. kulmská droba tvoří převážnou část Oderských vrchů, Nížkého Jeseníku a Dražanské vrchoviny. Používá se do betonu, asfaltu, jako kamenivo pro nezpevněné směsi, pro kolejové lože a další. Těží se za pomoci clonových odstřelů, které sestávají z 1-2 řad záhlavních vrtů a 1 řady patního vrtu. Z jednoho odstřelu je přibližně 20 000 t kamenných bloků. Nakládají se pomocí bagru na dumpéry ( 40 t ), ten je odveze na výrobní linku. Zpracování vytěženého lomového kamene začíná drcením v čelistových, kuželových, vertikálních nebo horizontálních odrazových drtičích. Drcení se využívá nejen pro zmenšení velkých kusů, ale také pro zlepšení jejich tvaru. Předrcené kamenivo je přepraveno pomocí pásů na síta k třídění. Kamenivo je podle velikosti zrn tříděno do různých frakcí, jílové částice jsou vymývány a ukládány do kalových polí. Konečné frakce jsou skladovány v silech nebo na zemních skládkách. Objemová hmotnost moravské droby – viz. kapitola 3.4. Granulometrie moravské droby – viz. kapitola 3.5.

### 3.2 Čedič

Čedič neboli bazalt je tmavá výlevná vyvřelá hornina ( obr. 3.2.1 ). Je nejhojnější vyvřelou horninou zemského povrchu. Obsahuje minerály jako jsou pyroxeny, plagioklasy a olivín. Zpracovává se ve slévárnách čediče a následně se z něj vyrábějí dlažby pro odolné průmyslové podlahy, žlaby a ořezuvzdorné potrubí, které slouží pro pneumatickou nebo hydraulickou dopravu abrazivních materiálů nebo pro kanalizaci. Roztavený čedič se dá také rozvláknit. Tyto vlákna jsou vysoce pevná a ohebná, mají lepší fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti než vlákna skleněná či azbestová. Používají se ve stavebnictví,

v leteckém průmyslu, pro výrobu tepelných, zvukových a chemických izolací, dále pro výrobu vysokopevnostních, tepelně odolných Hi-Tech šňůr a sítí. V neposlední řadě se čedič používá jako štěrk a kamenivo do betonu. Objemová hmotnost čediče – viz. kapitola 3.4. Granulometrie čediče – viz. kapitola 3.5.



Obrázek 3.2.1 – čedič frakce 8-16

### 3.3 Tovačov

Je přírodní těžžený písek ( obr. 3.3.1 ). Objemová hmotnost písku Tovačov – viz. kapitola 3.4. Granulometrie písku Tovačov – viz. kapitola 3.5.



Obrázek 3.3.1 – tovačov frakce 0-4

### 3.4 Objemová hmotnost kameniva – stanovení objemové hmotnosti kameniva – Pyknometrická metoda pro zrna kameniva od 0,063 mm do 31,5 mm

Byla připravena dílčí navážka a pyknometr (obr. 3.4.1 ). Hmotnost navážky se určila dle tabulky ( tab. 3.4.1 ). Vzorek kameniva byl vložen do pyknometru a zalil se vodou, tak aby byl zcela ponořen. Ponechal se ve vodě 24 hodin. Poté byla odlita voda a vzorek povrchově osušen. Vzorek byl zvážen – hmotnost  $m_a$ . Kamenivo se opět vložilo do pyknometru a ten byl naplněn vodou. Obsah pyknometru se promíchal, aby byly odstraněny vzduchové bubliny mezi jednotlivými zrny kameniva. Pyknometr byl naplněn vodou až po hrot, osušen a zvážen – hmotnost  $m_b$ . Voda z pyknometru se vylila a kamenivo bylo dáno na 24 hodin do sušárny při teplotě  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Poté se vzorek kameniva zvážil - hmotnost  $m_d$ . Pyknometr byl naplněn vodou až po hrot a opět zvážen – hmotnost  $m_c$ .



Obrázek 3.4.1 - Pyknometr

Objemová hmotnost nasyceného povrchově osušeného vzorku se spočítla ze vztahu :

$$\rho_{ps} = \frac{m_a}{m_a - (m_b - m_c)} * \rho_w \quad [9]$$



Objemová hmotnost vysušeného vzorku se spočítá ze vztahu :

$$\rho_{po} = \frac{m_d}{m_a - (m_b - m_c)} * \rho_w \quad [9]$$

$m_a$  – hmotnost nasyceného povrchově osušeného vzorku [ g ]

$m_b$  – celková hmotnost pyknometru, kameniva a vody [ g ]

$m_c$  – celková hmotnost pyknometru s vodou [ g ]

$m_d$  – hmotnost vysušeného vzorku [ g ]

$\rho_w$  – hustota vody [ Mg\*m<sup>-3</sup> ]

Horní mez frakce kameniva	Min. hmotnost dílčí navážky
[ mm ]	[ kg ]
31,5	1,5
16	1,0
8	0,5
4 ( nebo menší )	0,25

Tabulka 3.4.1 – Nejmenší hmotnost dílčích navážek [ 9 ]

Zkouška byla provedena pro 3 druhy kameniva. Pro každý druh kameniva se připravily 3 zkušební navážky. Naměřené hodnoty a výsledky jsou uvedeny v tabulce ( tab. 3.4.2 ).



VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA										
STAVEBNÍ FAKULTA										
L. Poděště 1875, 708 00 Ostrava - Poruba										
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT										
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ						Datum: 15.3.2010				
t : 26,7 °C		w : 29,8 %								
Stanovení objemové hmotnosti kameniva - pyknometrická metoda										
Název horniny	Číslo vzorku	ma [ g ]	mb [ g ]	mc [ g ]	md g ]	ρw [Mg*m <sup>-3</sup> ]	ρps [ Mg*m <sup>-3</sup> ]		ρpo [ Mg*m <sup>-3</sup> ]	
							dílčí	celková	dílčí	celková
MORAVSKÁ DROBA	1	1011,60	10769,80	10127,30	978,70	0,9956	2,74	2,75	2,65	2,67
	2	1011,70	10771,20	10127,30	981,40	0,9956	2,75		2,67	
	3	1012,00	10772,50	10127,30	981,80	0,9956	2,76		2,68	
ČEDIČ	1	1011,40	10786,30	10127,30	1000,70	0,9956	2,87	2,86	2,84	2,83
	2	1011,50	10783,20	10127,30	999,70	0,9956	2,84		2,81	
	3	1011,80	10785,10	10127,30	1000,50	0,9956	2,86		2,83	
TOVAČOV	1	251,80	10284,00	10127,30	240,50	0,9956	2,65	2,65	2,53	2,53
	2	252,00	10284,20	10127,30	240,80	0,9956	2,65		2,53	
	3	251,50	10283,80	10127,30	240,30	0,9956	2,65		2,53	

Tabulka 3.4.2 – Stanovení objemové hmotnosti kameniva

### 3.5 Sítový rozbor kameniva

Důležitým ukazatelem pro použití kameniva do betonu je jeho granulometrie. „Zrnitost kameniva vyjadřuje skladbu různě velkých zrn různého tvaru.“ [ 1 ] Množství a velikost jednotlivých zrn se stanovuje pomocí sítového rozboru. Zrnům, která se zachytí na síti říkáme frakce. Čára zrnitosti vyjadřuje zrnitost kameniva, získám ji z tohoto vztahu:

$$y = \left( \frac{d}{D_{\max}} \right)^n * 100 \quad [ 9 ] \quad y \dots \text{propad sítem o velikosti otvoru } d \text{ [ mm ]}$$

n... exponent [ dle Fullera n=0,5 ]

Připravila se dílčí navážka a zvažila se –  $M_1$ . Hmotnost navážky se určila dle tabulky (tab. 3.5.1). Zkušební postup sestával ze dvou částí. Praní a prosévání kameniva.

<b>Velikost max. zrna kameniva D</b>	<b>Min. hmotnost zkušební navážky</b>
[ mm ]	[ kg ]
63	40
32	10
16	2,6
8	0,6
≤4	0,2

**Tabulka 3.5.1 – Hmotnost zkušebních navážek pro hutné kamenivo [ 9 ]**

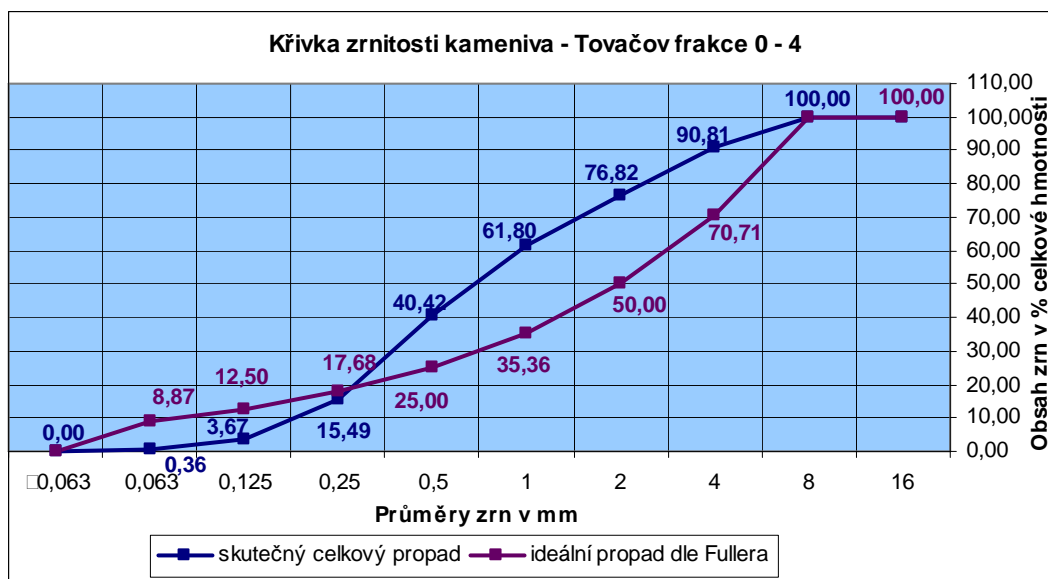
Praní slouží k tomu, abychom kamenivo zbavili nežádoucích jemných částic. Kamenivo se vložilo do nádoby, ta se naplnila vodou, tak aby byl vzorek zcela pod vodou. Vzorek se zamíchal. Připravilo se síto o velikosti ok 0,063 mm a navlhčilo se z obou stran, na toto síto se nasadilo odlehčovací síto o velikosti ok 1 mm. Připravená navážka byla vysypána na horní síto a vzorek byl promýván vodou, dokud nezačala téct čirá voda. Kamenivo, které se zachytilo na sítích, se vložilo do nádoby a vysušilo v sušárně při  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  do ustálené hmotnosti. Tato hmotnost byla zaznamenána –  $M_2$ .

Prosévání slouží k tomu, abychom zjistili procentuální zastoupení zrn jednotlivých velikostí. Do řady byly na sebe naskládány síta a to takto: dno a na něj postupně síta o velikosti ok 0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8; 16 mm ( obr. 3.5.1 ). Na horní síto se před spuštěním síťovacího zařízení vždy připevnilo víko. Vzorek kameniva, který byl proprán a vysušen se po dávkách sypal na horní síto. Síťovací zařízení síty mechanicky otřásalo po dobu 7 minut. Po ukončení procesu se postupně odebíraly jednotlivá síta a prosévání se dokončilo ještě ručně. Následně se zvážil zůstatek na síti s největšími rozměry – hmotnost  $R_1$  , dále se zvážily postupně zůstatky na ostatních sítích – hmotnosti  $R_2, R_3 \dots R_i$ . Částice, které propadly poslední kontrolním sítím s velikostí ok 0,063 mm na dno ( propad ) se také zvážily – hmotnost P.



Obrázek 3.5.1 – Síťovací zařízení

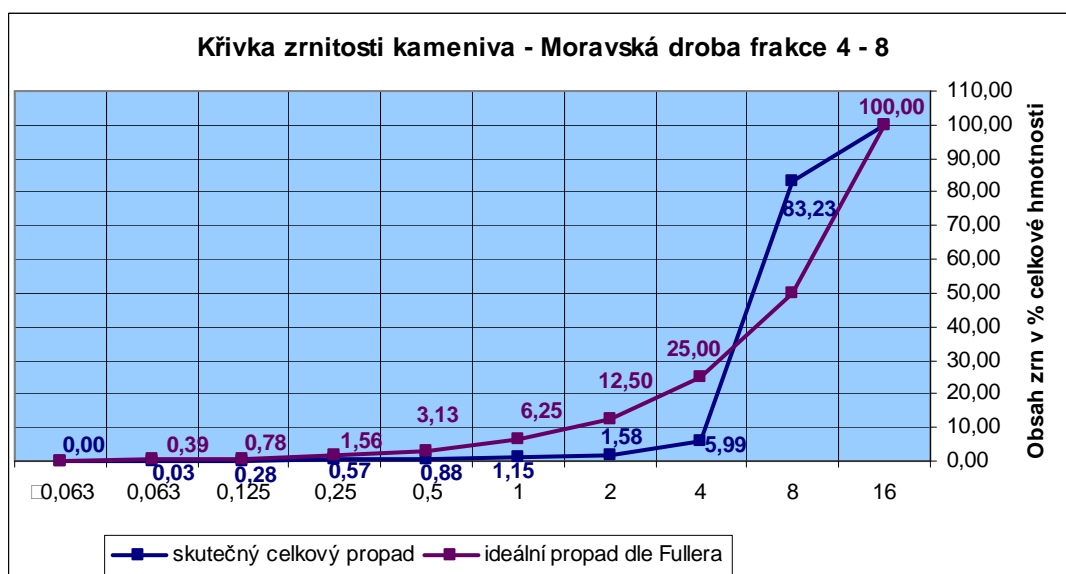
Zkouška byla provedena pro 3 druhy kameniva. Pro každý druh kameniva se připravila 1 zkušební navážka. Naměřené hodnoty a výsledky jsou uvedeny v tabulkách a grafech ( tab. 3.5.2, 3.5.3, 3.5.4, 3.5.5, graf a, b c, d ).



Graf a – Křivka zrnitosti kameniva – Tovačov frakce 0 – 4

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl: DENISA GRACOVÁ				Datum: 15.3.2010	
t : 26,7 °C		w : 29,8 %			
Sítový rozbor kameniva - tovačov frakce 0-4					
Kontrolní síto	Zbytek na sítě [ g ]	Zbytek [ % ]	Celkový zbytek [ % ]	Celkový propad [ % ]	ideální propad dle Fullera [ % ]
16	-	-	-	100,00	100,00
8	-	-	-	100,00	100,00
4	17,80	9,19	9,19	90,81	70,71
2	27,10	13,99	23,18	76,82	50,00
1	29,10	15,02	38,20	61,80	35,36
0,5	41,40	21,37	59,58	40,42	25,00
0,25	48,30	24,94	84,51	15,49	17,68
0,125	22,90	11,82	96,33	3,67	12,50
0,063	6,40	3,30	99,64	0,36	8,87
□0,063	0,70	0,36	100,00	0,00	0,00
Σ	193,70	100,00	-	-	-

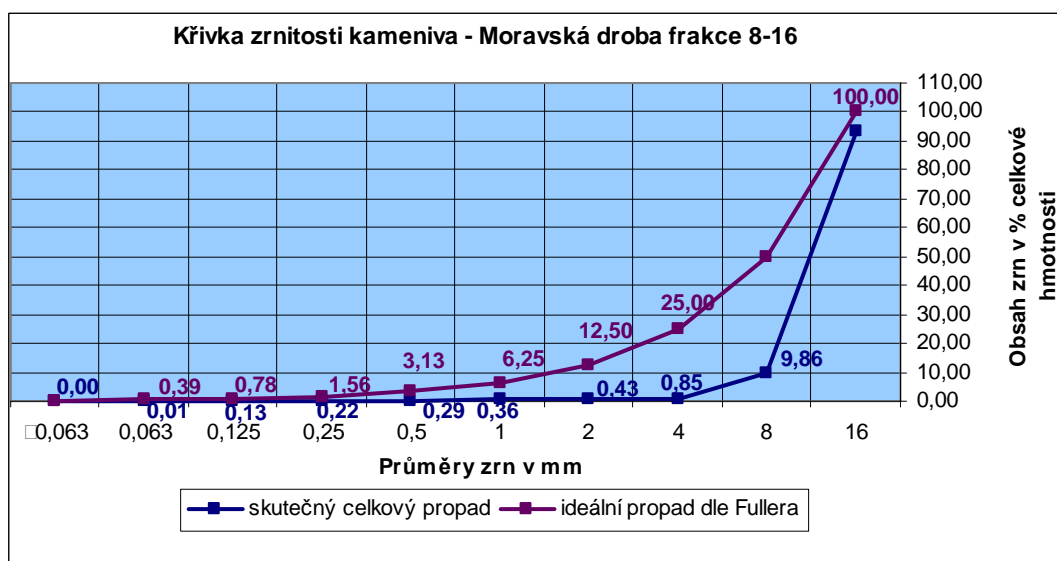
Tabulka 3.5.2 – Sítový rozbor kameniva – Tovačov frakce 0 – 4



Graf b – Křivka zrnitosti kameniva – Moravská droba frakce 4 – 8

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl: DENISA GRACOVÁ				Datum: 15.3.2010	
t : 26,7 °C		w : 29,8 %			
Sítový rozbor kameniva - moravská droba frakce 4-8					
Kontrolní síto	Zbytek na síti [ g ]	Zbytek [ % ]	Celkový zbytek [ % ]	Celkový propad [ % ]	ideální propad dle Fullera [ % ]
16	-	-	-	100,00	100,00
8	162,80	16,77	16,77	83,23	50,00
4	750,00	77,24	94,01	5,99	25,00
2	42,90	4,42	98,42	1,58	12,50
1	4,10	0,42	98,85	1,15	6,25
0,5	2,70	0,28	99,12	0,88	3,13
0,25	3,00	0,31	99,43	0,57	1,56
0,125	2,80	0,29	99,72	0,28	0,78
0,063	2,40	0,25	99,97	0,03	0,39
□0,063	0,30	0,03	100,00	0,00	0,00
Σ	971,00	100,00	-	-	-

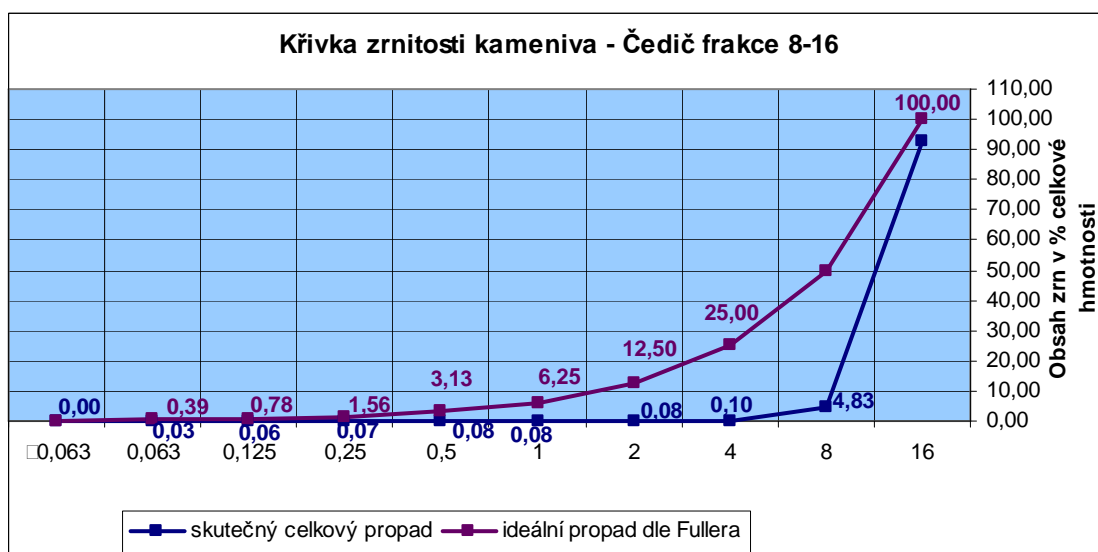
Tabulka 3.5.3 – Sítový rozbor kameniva – Moravská droba frakce 4 – 8



Graf c – Křivka zrnitosti kameniva – Moravská droba frakce 8 – 16

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl: DENISA GRACOVÁ				Datum: 15.3.2010	
t : 26,7 °C		w : 29,8 %			
Sítový rozbor kameniva - moravská droba frakce 8 - 16					
Kontrolní síto	Zbytek na sítě [ g ]	Zbytek [ % ]	Celkový zbytek [ % ]	Celkový propad [ % ]	ideální propad dle Fullera [ % ]
32	-	-	100	100	100
16	188,80	6,39	6,39	93,61	100,00
8	2475,10	83,75	90,14	9,86	50,00
4	266,40	9,01	99,15	0,85	25,00
2	12,30	0,42	99,57	0,43	12,50
1	2,20	0,07	99,64	0,36	6,25
0,5	1,80	0,06	99,71	0,29	3,13
0,25	2,10	0,07	99,78	0,22	1,56
0,125	2,90	0,10	99,87	0,13	0,78
0,063	3,40	0,12	99,99	0,01	0,39
□0,063	0,30	0,01	100,00	0,00	0,00
Σ	2955,30	100,00	-	-	-

Tabulka 3.5.4 – Sítový rozbor kameniva – Moravská droba frakce 8 – 16



Graf d – Křivka zrnitosti kameniva – Čedič frakce 8 – 16

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl: DENISA GRACOVÁ				Datum: 15.3.2010	
t : 26,7 °C		w : 29,8 %			
Sítový rozbor kameniva - čedič frakce 8 - 16					
Kontrolní síto	Zbytek na síti [ g ]	Zbytek [ % ]	Celkový zbytek [ % ]	Celkový propad [ % ]	ideální propad dle Fullera [ % ]
32	-	-	100	100	100
16	187,40	7,25	7,25	92,75	100,00
8	2274,30	87,93	95,17	4,83	50,00
4	122,20	4,72	99,90	0,10	25,00
2	0,50	0,02	99,92	0,08	12,50
1	0,00	0,00	99,92	0,08	6,25
0,5	0,10	0,00	99,92	0,08	3,13
0,25	0,20	0,01	99,93	0,07	1,56
0,125	0,30	0,01	99,94	0,06	0,78
0,063	0,60	0,02	99,97	0,03	0,39
□0,063	0,90	0,03	100,00	0,00	0,00
Σ	2586,50	100,00	-	-	-

Tabulka 3.5.5 – Sítový rozbor kameniva – Čedič frakce 8 – 16

#### **4. Cement**

„ Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi.“ [ 1 ] Když cement smícháme s vodou, tak postupně tvrdne a tuhne. Poté co zatvrdne, tak je stálý i ve vodě a zachovává si svou pevnost. Máme různé druhy cementů, ty se dělí dle směsnosti. Pro experimentální část mé bakalářské práce byl použit cement CEM I. 52,5R. Je to cement portlandský s pevností v tlaku 52,5 MPa a s rychlým nárůstem počátečních pevností.

Z chemického a mineralogického hlediska se cementy liší obsahem minerálů v cementu a slínku. Jedná se o oxidy  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Portlandský slínek obsahuje 60 – 68 %  $\text{CaO}$ , 20 – 24 %  $\text{SiO}_2$ , 4 – 8 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 2 – 4 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Obsah  $\text{CaO}$  a  $\text{SiO}_2$  v portlandském slínku musí být vyšší jak 50%. Objemová hmotnost portlandského cementu se pohybuje v mezích od 3050 – 3150  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Při tuhnutí a tvrdnutí cementu dochází k uvolňování hydratačního tepla. Vývoj hydratačního tepla závisí na tom, kolik daný cement obsahuje slínkových minerálů, tedy o jaký druh cementu se jedná.

#### **5. Voda**

Vodu přidáváme do betonu ze dvou důvodů. Za prvé, protože voda nastartuje proces hydratace v betonu a spolu s cementem utvoří pevnou strukturu cementového kamene. A za druhé, protože díky vodě je vytvořena betonová směs, s kterou se lépe pracuje.

Pokud vodu do betonu přidáváme, tak se jedná o vodu záměsovou. Aby proběhl proces hydratace správně a zcela, musíme beton udržovat ve vlhkém stavu. Betonové konstrukce vodou kropíme. Takové vodě se říká voda ošetřovací. U obou druhů těchto vod musíme dodržovat požadavky na jakost a kvalitu vody. Jedná se především o barvu vody, pH vody, zápach, obsah olejů a tuků, nerozpustných látek, chloridů, síranů, sacharidů a dalších látek. Pitná voda je vždy použitelná a nemusí se zkoušet. Objemová hmotnost vody je 1000  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .



## **6. Přísady**

Přísady jsou látky různého chemického složení. Při míchání betonu se do něj přidávají, aby zlepšovaly vlastnosti čerstvého či ztvrdlého betonu. Jejich množství se určuje na základě hmotnosti cementu v betonu. Přísada se dává v maximální množství 5% z hmotnosti cementu. Přísady jsou plastifikační a superplastifikační, ty redukují množství vody. Dále máme přísady stabilizační, ty zadržují vodu. A nakonec přísady provzdušňující, urychlující tuhnutí a tvrdnutí cementu, zpomalující tvrdnutí cementu a hydrofobizační přísady.

**Plastifikátory a superplastifikátory** – díky těmto přísadám se z betonem lépe pracuje a dochází k rychlejšímu a efektivnějšímu ztvrdnutí betonu. Snižují množství záměsové vody v betonu, tím pádem snižují vodní součinitel betonu a to má význačný vliv na pevnosti a trvanlivost betonu. Snížení vody v betonu má také za následek co nejmenší smrštění a dotvarování betonových konstrukcí. Plastifikační přísady se přidávají do čerstvého betonu až nakonec.

**Glenium 110** – plastifikační přísada, kapalná a viskózní, žlutočervené barvy o hustotě  $1,12 \text{ kg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Snižuje vodní součinitel bez toho, aby došlo ke ztrátě zpracovatelnosti. Neobsahuje chloridy a hodí se pro všechny druhy cementů. Má pozitivní vliv na krvácení betonů, zkracuje dobu zhutňování, zkracuje dobu, po kterou je beton nutno ošetřovat, snižuje teplotu potřebnou pro zrání betonových konstrukcí. Zlepšuje konečnou pevnost, modul pružnosti a přínavost betonu k ocelové výztuži. Základem chemické struktury jsou polymerní řetězce na bázi éteru karboxylových kyselin s dlouhými postranními řetězci. Díky těmto postranním řetězcům jsou jednotlivá zrna cementu od sebe dokonale oddělována a rovnoměrně rozptýlena.

**Glenium ACE40** – superplastifikační přísada, kapalná, hnědé barvy o hustotě  $1,06 \text{ g} \cdot \text{ml}^{-1}$ . „Rychlá absorpce molekul na cementové částice, kombinovaná s účinným disperzním efektem, odkrývá zvětšený povrch cementových částic pro reakci s vodou.“ [ 8 ] Díky tomuto procesu dochází k rychlejšímu nárůstu hydratačního tepla, proces hydratace se urychluje a počáteční pevnosti jsou vyšší. Do betonové směsi se přidává nakonec s poslední třetinou záměsové vody.

## 7. Příměsi

Příměsi jsou látky, které se do čerstvého betonu přidávají, aby zlepšili vlastnosti betonu, případně aby bylo docíleno zvláštních vlastností betonu. Jsou většinou v práškovém stavu. Rozdělujeme je na dva typy: na inertní příměsi a na pucolány nebo latentně hydraulické látky. Dále se mezi příměsi řadí barevné pigmenty a polymery.

**Mikrosilika** – „ je minerální směs, která vzniká jako odpad některých hutnických provozů.“ [ 10 ] Její měrný povrch je velký  $17\,000\text{--}30\,000\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ , má výborné pucolánové vlastnosti. Její hlavní složkou je amorfni  $\text{SiO}_2$  – kolem 90 %. Pozitivně ovlivňuje vznik trhlin, ke kterým dochází při rozpínání betonu. Rozpínání betonu se děje v důsledku alkalicko-křemičité reakce, kdy reagují alkálie s kamenivem a vzniká alkalicko- křemičitý gel. Ten způsobuje zvětšování objemu betonu, který vyvolává velké tlaky. To vede k roztržení struktury betonu. Díky použití mikrosiliky do betonu jako příměsi můžeme této reakci zabránit. Při procesu hydratace cementu vznikají v betonu dvě hlavní složky. Je to C-S-H gel ( hydrosilikátový gel ) a C-H ( hydroxid vápenatý ). C-S-H gel plní v betonu hlavní funkci a to, že je nositelem pevnosti betonu. Po přidání mikrosiliky do betonu se díky reakci přemění složka C-H také na složku C-S-H. Díky této reakci mají betony s obsahem mikrosiliky vyšší pevnosti a jsou odolné proti chemickým látkám. Jelikož jsou zrna mikrosiliky mnohonásobně ( 100-150 krát ) menší než zrna cementu, plní mikrosilika v betonu ještě jednu funkci a to fyzikální. Vyplňuje prázdná místa vytvořená volnou vodou ve struktuře betonu a tím zlepšuje nepropustnost betonu. Proto betony, které obsahují mikrosiliku, jsou odolnější proti agresivnímu prostředí a tedy trvanlivější.

## **8. Čerstvý beton**

Čerstvý beton je beton s takovou konzistencí, která umožňuje jeho zhutnění. Díky správnému a dokonalému zhutnění se docílí minimálního obsahu vzduchových pórů v betonu.

### **8.1 Návrh složení betonu**

Návrh betonu se odvíjí od požadovaných vlastností betonu. Při návrhu složení betonové směsi uvažujeme vždy požadovanou pevnost betonu v tlaku vyšší o 4 až 6 MPa. Musíme znát objemové hmotnosti jednotlivých složek betonu. Dále bereme při návrhu v úvahu stupeň agresivity prostředí, ve kterém se bude hotová betonová konstrukce vyskytovat a požadovanou konzistenci čerstvého betonu.

Při samotném návrhu betonu se postupuje následně. Je třeba zvolit maximální zrno použitého kameniva, to se děje na základě minimálního rozměru konstrukce, minimální vzdálenosti jednotlivých prutů konstrukce a krycí vrstvy výztuže. Vypočte se návrhová pevnost betonu dle ČSN EN 206-1, kterou uvažujeme o 6 MPa vyšší než je požadovaná krychelná pevnost betonu v tlaku. Na základě této pevnosti je zvolena pevnostní třída cementu, která je stejná nebo vyšší než návrhová pevnost betonu. Poté je zvolen koeficient kvality kameniva  $a_k$ , jehož hodnota je 0,5 pro nejhorší kamenivo ( drcené ) a 0,6 pro nejlepší kamenivo ( těžené ). Jelikož se do betonu používá jak těžené kamenivo ( frakce 0-4 ), tak drcené kamenivo ( frakce 4-16 ), proto se koeficient kameniva stanoví jako střední hodnota mezi 0,5 a 0,6. Tedy 0,55. Dalším krokem ve výpočtu je stanovení poměru hmotnosti cementu k množství vody z Bolomeyovy rovnice:

$$R_b = a_k * R_c * \left( \frac{m_c}{m_v} - 0,5 \right) \Rightarrow m_c = \left( \frac{R_b}{a_k * R_c} + 0,5 \right) * m_v \quad [ 1 ]$$

$R_b$       návrhová pevnost betonu      [ MPa ]

$R_c$       pevnost cementu      [ MPa ]

$a_k$       koeficient kvality kameniva      [ - ]

$m_c$  hmotnost cementu [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$m_v$  hmotnost vody [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

Následně je vypočteno množství vody, které je potřebné pro smáčení kameniva a hydrataci cementu. K tomuto výpočtu je potřeba znát síťový rozbor použitého kameniva a stanovit zbytky na sítích v %. Nakonec se vypočte množství kameniva z rovnice absolutních objemů :

$$\frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_k}{\rho_k} = 1 - \frac{V_z}{100} \cdot [ 1 ]$$

$m_c$  hmotnost cementu [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$m_v$  hmotnost vody [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$m_k$  hmotnost kameniva [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$\rho_c$  objemová hmotnost cementu [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$\rho_v$  objemová hmotnost vody [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$\rho_k$  objemová hmotnost kameniva [ kg\*m<sup>-3</sup> ]

$V_z$  objem vzduchových pórů [ % ]

Přepočítají se jednotlivé složky betonu. Součástí návrhu betonu je kontrola vodního součinitele  $w$  dle vztahu:

$$w = \frac{m_v}{m_c} \cdot [ 1 ]$$

Kontrola obsahu tuhých částic o velikosti do 0,25 mm dle vzathu:

$$V_{ct} = v * M = v * \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_k}\right) = \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{w * m_c}{\rho_v} + \frac{p_{0,25} * m_k}{100 * \rho_k} . [ 1 ]$$

A přebytek cementového tmele dle vztahu:

$$m_c + m_{(0,25)} \leq 530 \text{ kg} * \text{m}^{-3} \dots \text{doporuč. hodnota pro } D_{\max} = 16 \text{ mm} . [ 1 ]$$

RECEPTURA			
Referenční záměs			
Objem		<b>m<sup>3</sup></b>	<b>34 l</b>
Cement		340 kg	11,5 kg
kamenivo	Tovačov 0-4	900 kg	30,6 kg
	Mdroba 4-8	225 kg	7,7 kg
	Mdroba 8-16	713 kg	24,2 kg
Voda		168 l	5,73 kg
Plastifikátor g110		2,38 kg	81 g
Záměs se sníženým vodním součinitelem			
Objem		<b>m<sup>3</sup></b>	<b>34 l</b>
Cement		340 kg	11,5 kg
kamenivo	Tovačov 0-4	943 kg	32,1 kg
	Mdroba 4-8	236 kg	8,02 kg
	Mdroba 8-16	747 kg	25,4 kg
Voda		133 l	4,914 kg
Plastifikátor a430		4,76 kg	162 g

Tabulka 8.1.1 - Receptura

Záměs s mikrosilikou			
Objem		<b>m<sup>3</sup></b>	<b>34 l</b>
Cement		315 kg	10,71 kg
kamenivo	Tovačov 0-4	895 kg	30,4 kg
	Mdroba 4-8	224 kg	7,6 kg
	Mdroba 8-16	709 kg	24,1 kg
Mikrosilika		25 kg	0,857 kg
Voda		169 l	5,73 kg
Plastifikátor a430		2,381 kg	130 g
Záměs s čedičem			
Objem		<b>m<sup>3</sup></b>	<b>34 l</b>
Cement		340 kg	11,5 kg
kamenivo	Tovačov 0-4	900 kg	30,6 kg
	Mdroba 4-8	225 kg	7,7 kg
	Mdroba 8-16	356 kg	12,1 kg
	Čedič 8-16	375 kg	12,745 kg
Voda		168 l	5,7 kg
Plastifikátor g110		2,38 kg	130 g

Tabulka 8.1.2 - Receptura

### **8.2 Zpracování čerstvého betonu**

Byly naváženy jednotlivé složky betonu. Vnitřní prostor míchačky a lopatky míchačky se navlhčily. Do míchačky se nasypaly složky v následujícím pořadí. Kamenivo spolu s 1/3 vody a spustil se míchací program na 30s. Poté byl přisypán cement a zbývající 2/3 vody spolu s plastifikační přísadou. Okamžik, kdy byla do betonu přidána poslední dávka vody se zaznamenal jako čas 0. Od této chvíle se záměs míchala 120s. Po dokončení míchacího cyklu byly provedeny zkoušky. Zkouška konzistence – rozlitím ( kapitola 8.3 ) a zkouška, která stanovila obsah vzduchu v betonu ( kapitola 8.4 ). Připravené formy, které byly vymazány odformovacím olejem, byly plněny čerstvým betonem a to tak, že se nejprve naplnily do poloviny, zhutnily se na vibračním stolku a poté byly naplněny zcela a zhutněny. Doba zhutnění byla individuální, hutnění probíhalo tak dlouho, dokud z betonu unikl přebytečný vzduch. To se projevuje tak, že se při zhutňování tvoří na povrchu betonu bublinky se vzduchem, který uniká. Naplněné formy byly uloženy na místo se stabilní teplotou a vlhkostí. Přikryly se igelitovou fólií, aby nedocházelo ke zbytečnému vysychání betonu. Následující den byly zkušební vzorky odformovány a uloženy do vody na 28 dní.

Postup míchání byl u všech záměsů stejný. Pouze u záměsi s mikrosilikou se tato příměs dávkovala spolu s kamenivem a první třetinou vody.

### **8.3 Zkouška konzistence čerstvého betonu**

Byl připraven setřásací stolek, dusadlo, forma ( obr. 8.3.1 ), pravítko, lopatka a stopky. Setřásací stolek a forma se navlhčily, forma se umístila na setřásací stolek doprostřed, přišlápla se a byla plněna. Plnilo se ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva byla zhutněna deseti rázy dřevěným dusadlem. Horní povrch se zarovnal, tak aby byl zároveň s okraji formy. Poté, co se forma nadzvedla, se horní deska setřásacího stolku 15 krát nadzvednula a nechala 15 krát volně padat. Nakonec byly změřeny dva největší rozměry  $d_1$  a  $d_2$  rozlitého betonu ve dvou na sebe kolmých směrech. Z těchto hodnot bylo vypočteno rozlití dle vztahu:  $(d_1 + d_2)/2$  a dle tabulky ( tab. 8.3.1 ) byl stanoven stupeň konzistence čerstvého betonu. Výsledky byly zaznamenány do tabulky ( tab. 8.3.2 ).



Obrázek 8.3.1 Setřásací stůlek, dusadlo a forma

Stupeň	Průměr rozlití v mm
F1 – směs tuhá	$\leq 340$
F2 – směs plastická	350 - 410
F3 – směs měkká	420 – 480
F4 – směs velmi měkká	490 – 550
F5 – směs tekutá	560 – 620
F6 – směs velmi tekutá	$\geq 630$

Tabulka 8.3.1 - Klasifikace podle rozlití [ 9 ]

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ				Datum: 18.3.2010	
t: 26 °C		w: 50 %			
Stanovení konzistence čerstvého betonu - rozlitím					
Čerstvý beton	Popis záměsi	d <sub>1</sub> ( mm )	d <sub>2</sub> ( mm )	Rozlití ( mm )	Klasifikace
1	Referenční	355	350	350	F2
2	Snížený w	350	350	350	F2
3	S mikrosilikou	360	365	360	F2
4	S čedičem	365	365	370	F2

Tabulka 8.3.2 – Stanovení konzistence čerstvého betonu – rozlitím



#### **8.4 Stanovení množství vzduchu v betonu a objemová hmotnost betonu**

Připravila se zkušební nádoba s nástavcem ( obr. 8.4.1 ), lopatka, nádobka s vodou, houbička, váha a vibrační stůl. Váha byla vytárována na hmotnost zkušební nádoby. Zkušební nádoba se naplnila čerstvým betonem, zhutnila se na vibračním stolku a následně se zvažila hmotnost čerstvého betonu v ní – m. Okraje nádoby byly řádně očištěny od betonu. Okraje nástavce, které přiléhají k nádobě se navlhčili a nástavec se připevnil k nádobě. Do nádoby byla prostřednictvím dvou otvorů, které se nacházejí na nástavci, nalita voda. To že prostor, který vznikl mezi povrchem betonu a vnitřním povrchem nástavce, byl zcela zaplněn vodou, se poznalo tak, že když byla voda litá jedním otvorem nástavce, tak druhým otvorem vytékala. Poté byly oba tyto otvory uzavřeny. Do nádoby se napumpoval vzduch. Měřidlo, které měří obsah vzduchu se nastavilo na nulu. Nakonec byl uvolněn ventil a odečetla se hodnota množství vzduchu v betonu. Výsledky byly zaznamenány do tabulky ( tab. 8.4.1 ).



**Obrázek 8.4.1 – Nádoba s nástavcem pro měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu**

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA					
STAVEBNÍ FAKULTA					
L. Poděště 1875, 708 00 Ostrava - Poruba					
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT					
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ			Datum: 18.3.2010		
t: 26 °C		w: 50 %			
Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu a objemová hmotnost čerstvého betonu					
Čerstvý beton	Popis záměsi	m ( kg )	V ( m³)	ρ (kg*m <sup>-3</sup> )	Obsah vzduchu ( % )
1	Referenční	18,90	0,008	2362,50	2,8
2	Snížený w	19,60	0,008	2450,00	2,6
3	S mikrosilikou	19,00	0,008	2375,00	3,1
4	S čedičem	19,60	0,008	2450,00	2,45

Tabulka 8.4.1 – Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu a objemová hmotnost čerstvého betonu

## 9. Pevnost betonu v tlaku

Pevnost betonu je hlavní vlastností, kterou u betonových konstrukcí posuzujeme. Díky pevnosti betonu dokáže navržená konstrukce odolávat napětím, kterým je vystavena, a proto je důležité tuto vlastnost betonu sledovat. Betonové konstrukce jsou ve většině případů namáhané kombinacemi tlakových, tahových a smykových napětí. Kombinace těchto napětí jsou různé a je jich mnoho. Proto napětí, která vznikají v konstrukcích jsou různě lokalizované, mají rozdílnou velikost a rozdílný směr působení. Při překročení meze pevnosti betonu dochází k porušení pevnosti betonu. V betonu mohou vznikat pouze trhlinky, v tomto případě je porušení betonu lokální. Může však dojít k porušení v celém průřezu betonové konstrukce, a tak dojde k její destrukci. Při překročení 40 – 50 % lomové pevnosti betonu vznikají v konstrukci trhlinky. To je způsobeno vlivem zvětšování napětí v konstrukci. Počet a velikost těchto trhlinek se zvětšuje až dojde k porušení soudržnosti betonové konstrukce a její destrukci.

Beton je křehký materiál, proto je pevnost betonu v tahu a ve smyku podstatně menší, než je jeho pevnost v tlaku. Beton je nehomogenní materiál, proto jsou soudržné síly v betonu různé. Z tohoto důvodu nelze popsat nebo vyjádřit fyzikálním způsobem vztah mezi složením betonu a jeho pevností. Vytváříme zkušební tělesa, která následně zatěžujeme. Pomocí pravděpodobnostního výpočtu získáváme hodnoty pevností betonů, které využíváme v praxi, a které mají stochastický charakter.

**Zkouška** – Jako zkušební tělesa byly zvoleny krychle o rozměrech 150\*150\*150 mm. Jejich rozměry byly před zkouškou přeměřeny a zvážily se. Očistily se hrany krychlí a každá krychle byla postupně vložena do lisu, tak aby lis tlačil na vzorky kolmo na jejich směr plnění. Nastavila se konstantní rychlost zatěžování a spustil se zatěžovací proces. Zatěžování vzorku probíhalo rovnoměrně, až do jeho porušení ( obr. 9.1 ). Pak se zaznamenala síla, kterou bylo těleso porušeno. A vypočetla se pevnost betonu v tlaku dle vztahu:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [MPa] \quad F..... \text{ síla, při které došlo k porušení vzorku } [N]$$

A.... plocha, která byla stlačována lisem [ m<sup>2</sup> ]

. Naměřené hodnoty a výsledky byly zaznamenány do tabulky ( tab. 9.1, 9.2, 9.3 ). Zkoušely se pevnosti vzorků po 1 dni a po 28 dnech. Porušení vzorků jednotlivých záměsů je zachyceno na obrázcích ( obr. 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 ).



**Obrázek 9.1 Porušení vzorku v lisu**



**Obrázek 9.2 – Porušení referenčních vzorků**



**Obrázek 9.3 – Porušení vzorků se sníženým vodním součinitelem**





Obrázek 9.4 – Porušení vzorků s mikrosilikou



Obrázek 9.5 – Porušení vzorků s čedičem

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA									
STAVEBNÍ FAKULTA									
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba									
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT									
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 19.3.2010				
t: 23,6 °C			w: 34,4 %						
Stanovení krychelné pevnosti v tlaku betonu po 1 dni									
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]			m [ kg ]	V ( m³ )	ρ (kg*m <sup>-3</sup> )	A ( m² )	F [ kN ]	σ [ MPa ]
	a	b	h						
DR4	147,20	149,57	151,32	7,7990	0,00333	2340,94	0,02202	565,503	25,69
DW4	150,22	150,66	151,66	8,1750	0,00343	2381,72	0,02263	824,813	36,44
DM4	149,38	149,68	150,08	7,9060	0,00336	2356,01	0,02236	375,848	16,81
DČ4	148,76	149,53	150,14	8,0230	0,00334	2402,29	0,02224	369,657	16,62

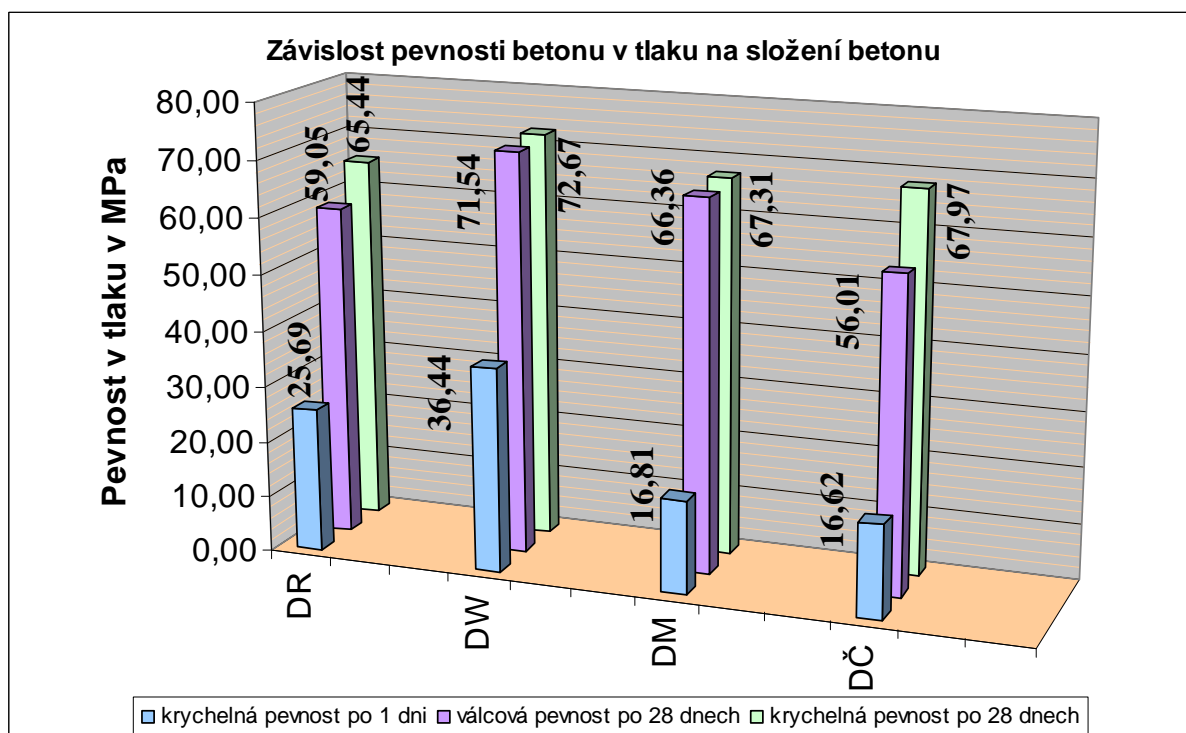
Tabulka 9.1 – Krychelná pevnost betonu v tlaku po 1 dni

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA									
STAVEBNÍ FAKULTA									
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba									
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT									
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 21.4.2010				
t: 23,6 °C			w: 34,4 %						
Stanovení krychelné pevnosti v tlaku betonu po 28 dnech									
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]			m [ kg ]	V ( m³ )	ρ (kg*m <sup>-3</sup> )	A ( m² )	F [ kN ]	σ [ MPa ]
	a	b	h						
DR1	148,96	149,41	147,56	7,8455	0,00328	2388,93	0,02226	1430,25	64,26
DR2	149,39	148,90	147,52	7,8235	0,00328	2384,15	0,02224	1457,67	65,53
DR3	146,61	150,08	147,39	7,7800	0,00324	2398,97	0,02200	1464,01	66,54
PRŮMĚR									65,44
DW1	152,63	149,76	146,76	8,1115	0,00335	2418,01	0,02286	1562,77	68,37
DW2	148,85	149,50	147,24	8,0400	0,00328	2453,81	0,02225	1657,16	74,47
DW3	150,24	149,88	147,59	8,0740	0,00332	2429,42	0,02252	1692,65	75,17
PRŮMĚR									72,67
DM1	150,13	149,20	147,22	7,9270	0,00330	2403,84	0,02240	1510,21	67,42
DM2	149,53	150,45	146,82	7,9080	0,00330	2394,20	0,02250	1443,38	64,16
DM3	149,14	150,42	147,63	7,8045	0,00331	2356,52	0,02243	1577,87	70,34
PRŮMĚR									67,31
DČ1	149,44	148,71	146,91	7,9460	0,00326	2433,83	0,02222	1518,86	68,35
DČ2	148,31	150,02	147,37	8,0110	0,00328	2443,19	0,02225	1554,99	69,89
DČ3	149,49	149,46	147,25	7,9830	0,00329	2426,46	0,02234	1467,51	65,68
PRŮMĚR									67,97

Tabulka 9.2 – Krychelná pevnost betonu v tlaku po 28 dnech

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA								
STAVEBNÍ FAKULTA								
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba								
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT								
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 21.4.2010			
t: 23,6 °C		34,40%						
Stanovení válcové pevnosti v tlaku betonu po 28 dnech								
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]		m [ kg ]	V ( m³ )	ρ (kg*m <sup>-3</sup> )	A ( m² )	F [ kN ]	σ [ MPa ]
	v	d						
DR5	295,00	149,50	12,4255	0,00518	2399,49	0,01755	1021,90	58,22
DR6	291,00	149,30	12,4050	0,00509	2434,97	0,01751	1049,70	59,96
DR7	294,00	149,50	12,3285	0,00516	2388,86	0,01755	1035,30	58,98
PRŮMĚR								59,05
DW5	294,00	149,50	12,6120	0,00516	2443,79	0,01755	1237,00	70,47
DW6	296,00	149,50	12,7415	0,00520	2452,20	0,01755	1246,80	71,03
DW7	295,00	149,45	12,6200	0,00517	2438,68	0,01754	1282,70	73,12
PRŮMĚR								71,54
DM5	291,00	150,40	12,4750	0,00517	2413,03	0,01777	1179,30	66,38
DM6	291,00	150,70	12,3960	0,00519	2388,21	0,01784	1219,30	68,36
DM7	291,00	149,45	12,3125	0,00510	2411,97	0,01754	1128,70	64,34
PRŮMĚR								66,36
DČ5	293,00	150,60	12,7870	0,00522	2449,97	0,01781	958,10	53,79
DČ6	291,00	150,15	12,6500	0,00515	2455,03	0,01771	967,40	54,63
DČ7	295,00	150,60	12,9150	0,00525	2457,72	0,01781	1061,90	59,61
PRŮMĚR								56,01

Tabulka 9.3 – Válcová pevnost betonu v tlaku po 28 dnech



**Graf e– závislost pevnosti betonu v tlaku na složení betonu**



## **10. Modul pružnosti betonu**

Modul pružnosti  $E$  vyjadřuje závislost relativního přetvoření na napětí. Závislost těchto dvou veličin je lineární pouze v počátku zatěžování a při vyšším napětí hodnota modulu pružnosti klesá. Při dosažení kolem 30% zlomového napětí se začnou na vzorcích vytvářet trhlinky. Tyto trhlinky jsou projevem trvalé (plastické) deformace. Modul pružnosti ovlivňují různé faktory. Je to prostředí, ve kterém se beton nachází. Tím, že beton uložíme do vody při procesu jeho zrání, zvýšíme jeho modul pružnosti. „Modul pružnosti je závislý na modulu pružnosti kameniva, cementového kamene a na podílu cementového kamene.“ [ 1 ]

### **10.1 Dynamický modul pružnosti betonu**

Zkouška dynamického modulu pružnosti je nedestruktivní. Provádí se pomocí ultrazvukového vlnění, kdy je na základě času a rychlosti průchodu ultrazvukových vln vzorkem stanoven dynamický modul pružnosti.

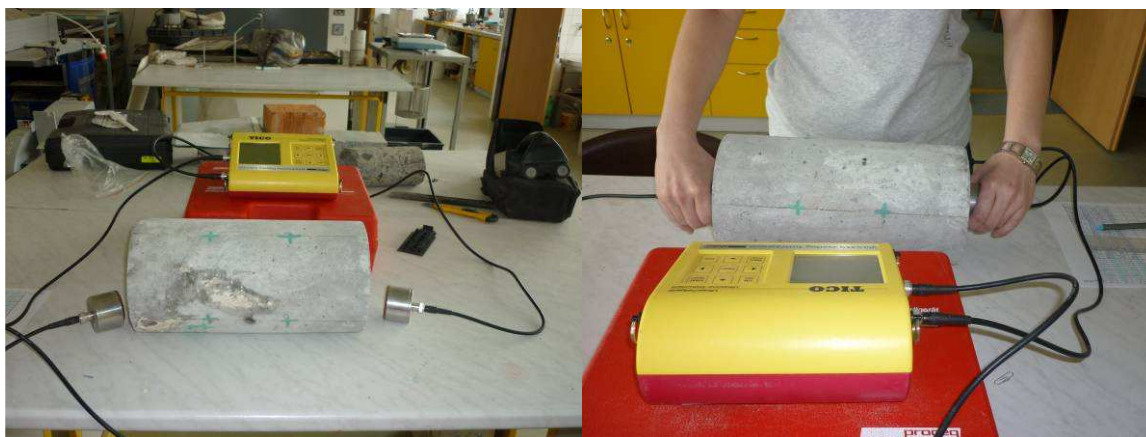
Zkouška byla provedena na sérii krychlí a válců. Před samotným provedením měření byly změřeny rozměry vzorku a zjištěna jejich hmotnost. Na vzorky se nakreslily body. Na tyto body se přikládaly sondy měřícího přístroje ( obr. 10.1.1), na displeji přístroje se zobrazoval čas a rychlost průchodu UZ vln materiálem ( obr. 10.1.2 ). Dynamický modul pružnosti byl vypočten ze vztahu :

$$E_{BU} = \frac{\rho_b * v_L^2}{10^6 * k^2}$$

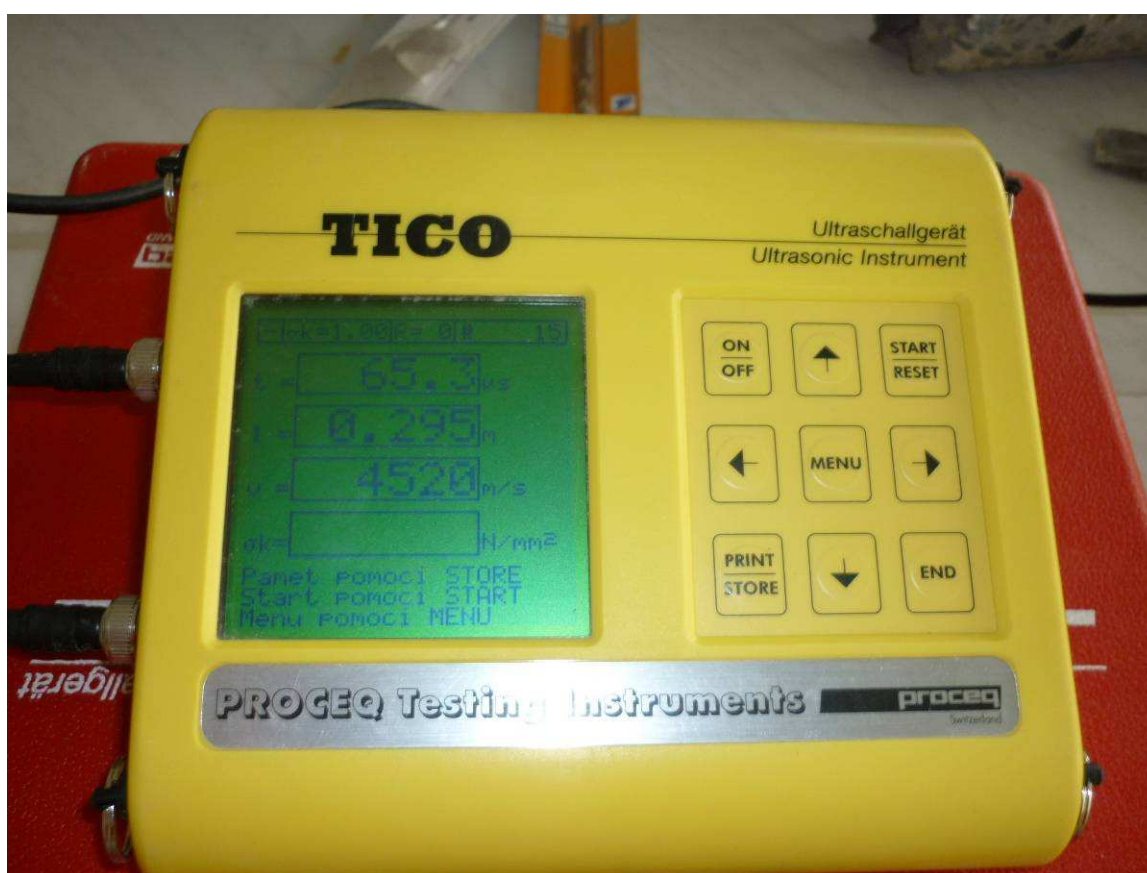
$\rho_b$ .....objemová hmotnost betonu v  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$v_L$ ..... impulzní rychlost podélného UZ vlnění v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

$k$ ..... součinitel rovnoměrnosti prostředí závislý na rovnoměrnosti prostředí a na dynamickém Poissonovu koeficientu



Obrázek 10.1.1 - Měření dynamického modulu pružnosti



Obrázek 10.1.2 – Displej UZ měřicího přístroje

Hodnoty měření a výsledky byly zaznamenány do tabulky ( tab. 10.1.1, 10.1.2 ). Srovnání výsledků dynamického modulu pružnosti měřeného na válcích a na krychlích – viz. graf f.

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA										
STAVEBNÍ FAKULTA										
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba										
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT										
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 19.4.2010					Průměrný E z každé záměsi v GPa
t: 23,6 °C		w: 34,4 %								
Stanovení dynamického modulu pružnosti na krychlích										
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]			m [ kg ]	V [ m³ ]	ρ [kg*m <sup>-3</sup> ]	t [ μs ]	v [ m/s ]	E [ MPa ]	
	a	b	h							
DR1	148,96	149,41	147,56	7,8455	0,00328	2388,93	34,2	4330	44789,73	
							34,0	4350	45204,45	
							34,7	4270	43557,04	
							35,2	4210	42341,56	
							35,8	4130	40747,67	
	PRUMER								43328,09	
DR2	149,39	148,90	147,52	7,8235	0,00328	2384,15	33,6	4410	46460,07	
							33,3	4410	46460,07	
							33,2	4440	47094,33	
							33,8	4380	45830,11	
							33,7	4390	46039,62	
	PRUMER								46376,84	
DR3	146,61	150,08	147,39	7,7800	0,00324	2398,97	33,5	4390	46039,62	
							34,1	4310	44376,92	
							33,3	4410	46460,07	
							34,1	4310	44376,92	
							33,9	4340	44996,85	
	PRUMER								45250,08	
DW1	152,63	149,76	146,76	8,1115	0,00335	2418,01	32,0	4590	50330,13	
							30,9	4760	54127,32	
							31,4	4680	52323,21	
							32,0	4590	50330,13	
							32,0	4590	50330,13	
	PRUMER								51488,18	
DW2	148,85	149,50	147,24	8,0400	0,00328	2453,81	32,4	4330	44789,73	
							32,4	4350	45204,45	
							32,2	4270	43557,04	
							32,7	4210	42341,56	
							32,5	4130	40747,67	
	PRUMER								43328,09	
DW3	150,24	149,88	147,59	8,0740	0,00332	2429,42	32,0	4630	51211,16	
							32,6	4540	49239,58	
							32,4	4570	49892,48	
							32,7	4530	49022,91	
							33,1	4470	47732,89	
	PRUMER								49419,80	

Tabulka 10.1.1 – Dynamický modul pružnosti betonu měřený na krychlích

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA										
STAVEBNÍ FAKULTA										
L. Poděšť 1875, 708 00 Ostrava - Poruba										
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT										
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ						Datum: 19.4.2010				Průměrný E z každé záměsi v GPa
t: 23,6 °C			w: 34,4 %							
Stanovení dynamického modulu pružnosti na krychlích										
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]			m [ kg ]	V [ m³ ]	ρ [kg*m <sup>-3</sup> ]	t [ μs ]	v [ m/s ]	E [ MPa ]	
	a	b	h							
DM1	150,13	149,20	147,22	7,9270	0,00330	2403,84	33,1	4440	47094,33	
							33,6	4380	45830,11	
							33,0	4460	47519,56	
							32,8	4480	47946,70	
							33,5	4390	46039,62	
	PRUMER								46886,06	
DM2	149,53	150,45	146,82	7,9080	0,00330	2394,20	32,8	4480	47946,70	
							33,2	4430	46882,43	
							33,4	4400	46249,60	
							33,4	4400	46249,60	
							33,7	4360	45412,52	
	PRUMER								46548,17	
DM3	149,14	150,42	147,63	7,8045	0,00331	2356,52	33,2	4460	47519,56	
							33,2	4460	47519,56	
							33,8	4380	45830,11	
							33,3	4440	47094,33	
							33,7	4390	46039,62	
	PRUMER								46800,63	
DČ1	149,44	148,71	146,91	7,9460	0,00326	2433,83	32,6	4510	48590,99	
							32,7	4500	48375,75	
							32,7	4500	48375,75	
							33,3	4410	46460,07	
							33,1	4410	46460,07	
	PRUMER								47652,52	
DČ2	148,31	150,02	147,37	8,0110	0,00328	2443,19	32,0	4590	50330,13	
							31,3	4700	52771,37	
							31,3	4700	52771,37	
							31,6	4650	51654,55	
							32,1	4580	50111,06	
	PRUMER								51527,69	
DČ3	149,49	149,46	147,25	7,9830	0,00329	2426,46	33,3	4410	46460,07	
							34,5	4260	43353,27	
							33,1	4440	47094,33	
							33,2	4430	46882,43	
							32,9	4470	47732,89	
	PRUMER								46304,60	

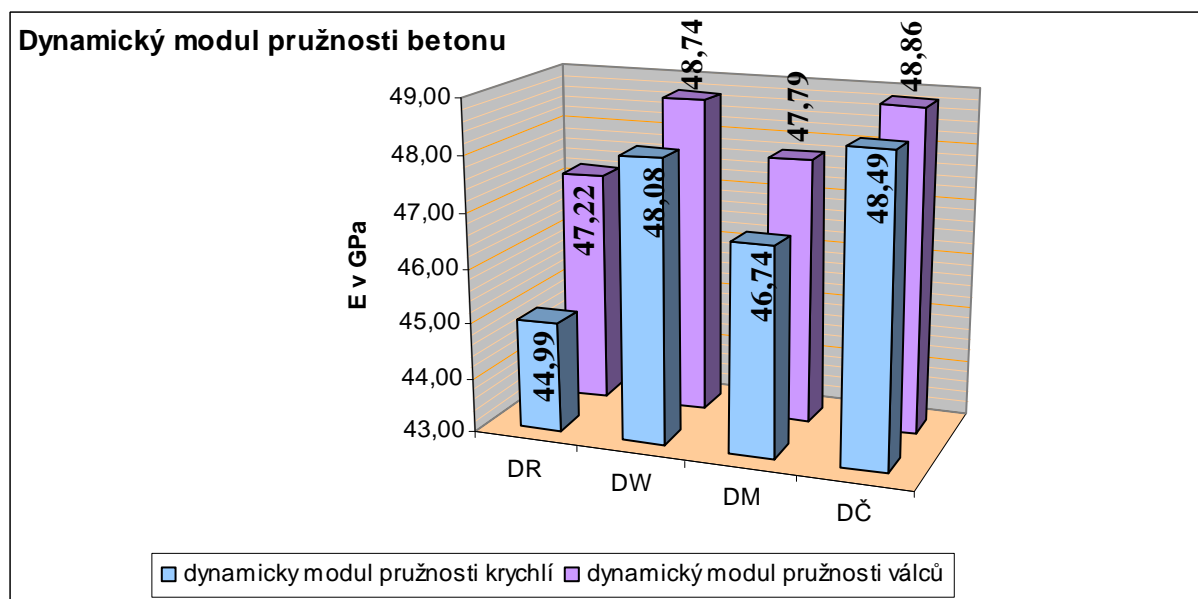
Tabulka 10.1.2 – Dynamický modul pružnosti betonu měřený na krychlích

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA								
STAVEBNÍ FAKULTA								
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba								
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT								
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 20.4.2010			
t: 23,6 °C		w: 34,4 %						
Stanovení dynamického modulu pružnosti na válcích								
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]		m [ kg ]	V [ m³ ]	ρ [kg*m <sup>-3</sup> ]	t [ μs ]	v [ m/s ]	E [ MPa ]
	v	d						
DR5	295,00	149,50	12,4255	0,00518	2399,49	66,4	4440	47302,66
						65,6	4500	48589,74
						65,6	4500	48589,74
						66,1	4460	47729,77
						66,1	4460	47729,77
PRŮMĚR								47988,34
DR6	291,00	149,30	12,4050	0,00509	2434,97	65,7	4430	47089,82
						66,4	4380	46032,84
						65,8	4420	46877,47
						66,3	4390	46243,28
						66,4	4380	46032,84
PRŮMĚR								46455,25
DR7	294,00	149,50	12,3285	0,00516	2388,86	66,6	4410	46665,59
						65,8	4470	47944,04
						66,2	4440	47302,66
						66,8	4400	46454,20
						66,0	4460	47729,77
PRŮMĚR								47219,25
DW5	294,00	149,50	12,6120	0,00516	2443,79	65,3	4500	48589,74
						64,8	4540	49457,40
						65,5	4490	48374,03
						64,7	4540	49457,40
						64,2	4580	50332,74
PRŮMĚR								49242,26
DW6	296,00	149,50	12,7415	0,00520	2452,20	65,4	4530	49239,77
						65,8	4500	48589,74
						64,8	4570	50113,18
						65,9	4490	48374,03
						65,9	4490	48374,03
PRŮMĚR								48938,15
DW7	295,00	149,45	12,6200	0,00517	2438,68	66,3	4450	47515,97
						66,1	4460	47729,77
						65,5	4500	48589,74
						65,6	4500	48589,74
						66,2	4460	47729,77
PRŮMĚR								48031,00
Průměrný E z každé záměsi v GPa								
47,22								
48,74								

Tabulka 10.1.3 – Dynamický modul pružnosti betonu měřený na válcích

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA								
STAVEBNÍ FAKULTA								
L. Poděštné 1875, 708 00 Ostrava - Poruba								
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT								
Zkoušku provedl : DENISA GRACOVÁ					Datum: 20.4.2010			
t: 23,6 °C		w: 34,4 %						
Stanovení dynamického modulu pružnosti na válcích								
Číslo vzorku	Rozměry [ mm ]		m [ kg ]	V [ m³ ]	ρ [kg*m <sup>-3</sup> ]	t [ μs ]	v [ m/s ]	E [ MPa ]
	v	d						
DM5	291,00	150,40	12,4750	0,00517	2413,03	66,0	4410	46665,59
						65,6	4440	47302,66
						65,8	4420	46877,47
						65,4	4450	47515,97
						66,2	4400	46454,20
PRŮMĚR								46963,18
DM6	291,00	150,70	12,3960	0,00519	2388,21	64,1	4540	49457,40
						64,8	4490	48374,03
						64,9	4480	48158,80
						63,6	4580	50332,74
						64,1	4540	49457,40
PRŮMĚR								49156,07
DM7	291,00	149,45	12,3125	0,00510	2411,97	66,0	4410	46665,59
						65,1	4470	47944,04
						65,1	4470	47944,04
						66,2	4400	46454,20
						65,6	4440	47302,66
PRŮMĚR								47262,11
DČ5	293,00	150,60	12,7870	0,00522	2449,97	65,1	4500	48589,74
						64,3	4560	49894,11
						66,7	4390	46243,28
						65,6	4470	47944,04
						64,9	4520	49022,61
PRŮMĚR								48338,76
DČ6	291,00	150,15	12,6500	0,00515	2455,03	63,9	4550	49675,52
						64,1	4540	49457,40
						63,5	4580	50332,74
						64,4	4520	49022,61
						65,5	4440	47302,66
PRŮMĚR								49158,18
DČ7	295,00	150,60	12,9150	0,00525	2457,72	64,4	4580	50332,74
						64,5	4570	50113,18
						66,4	4440	47302,66
						65,6	4500	48589,74
						65,3	4520	49022,61
PRŮMĚR								49072,19
Průměrný E z každé záměsi v GPa								
47,79								
48,86								

Tabulka 10.1.4 – Dynamický modul pružnosti betonu měřený na válcích



**Graf f – Závislost dynamického modulu pružnosti na složení betonu**



### 10.2 Statický modul pružnosti betonu

Statický modul pružnosti v tlaku  $E_c$  představuje pružnostní charakteristiku vyjadřující deformační vlastnosti materiálu v tlaku. Na základě Hookova zákona se zjišťují deformace od známého zatížení. Statický modul pružnosti získáme ze vztahu :

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b} \quad [N * mm^{-2}]$$

$\Delta\sigma$  .....rozdíl napětí

$\Delta\varepsilon$ .....rozdíl poměrného přetvoření

$\sigma_a$ .....horní zatěžovací napětí v  $N*mm^{-2}$

$\sigma_b$ ..... základní zatěžovací napětí v  $N*mm^{-2}$

$\varepsilon_a$ ..... průměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí v mm

$\varepsilon_b$ ..... průměrné přetvoření při spodním zatěžovacím napětí v mm

Zkouška statického modulu pružnosti byla prováděna na zkušebních válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm. Před zkouškou byly změřeny rozměry válců – jejich průměr a výška a hmotnost válců. Zkušební těleso bylo umístěno dostředně do hydraulického lisu. Na těleso bylo upevněno snímací zařízení a to dle následujících podmínek: snímací zařízení bylo upevněno na dvou protilehlých stranách, vzdálenost měřících bodů od konců tělesa byla  $L/4$  a snímaná vzdálenost byla 140 mm ( obr. 10.2.1 ). Poté byla odjištěna aretace snímacího zařízení. Bylo nastaveno horní zatěžovací napětí  $\sigma_a$ . Je to třetina z aritmetického průměru pevností v tlaku, ověřených na srovnávacích tělesech. Následně byl odstartován zkušební cyklus. Těleso bylo střídavě zatěžováno na horní hodnotu zatěžovacího napětí a odlehčováno na dolní hodnotu zatěžovacího napětí  $\sigma_b$ . Tento cyklus byl opakován 3\*-předběžný cyklus. Čtvrtý cyklus je zkušební. Po ukončení tohoto cyklu bylo počítačem vyhodnoceno měření. Byly získány hodnoty  $E$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon_b$ . Poté se ze vzorku dalo pryč snímací



zařízení a provedla se zkouška pevnosti betonu v tlaku ( obr. 10.2.2 ). Hodnoty měření a výsledky byly zaznamenány do tabulky ( tab. 10.2.1 ). Vyjádření výsledků závislosti statického modulu pružnosti na složení betonu je vyobrazeno v grafu ( graf g ).



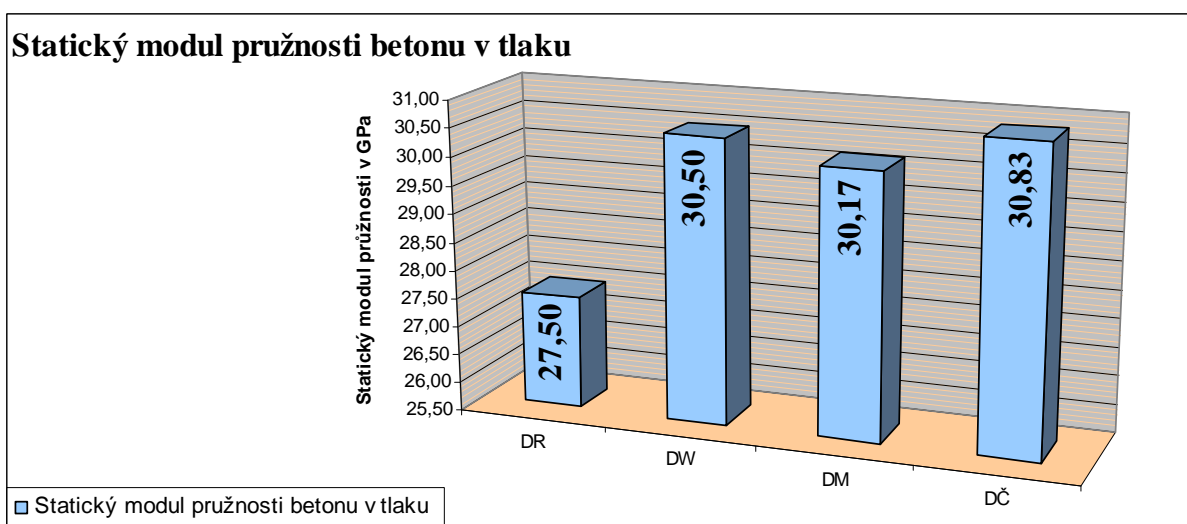
Obrázek 10.2.1 Měření statického modulu pružnosti



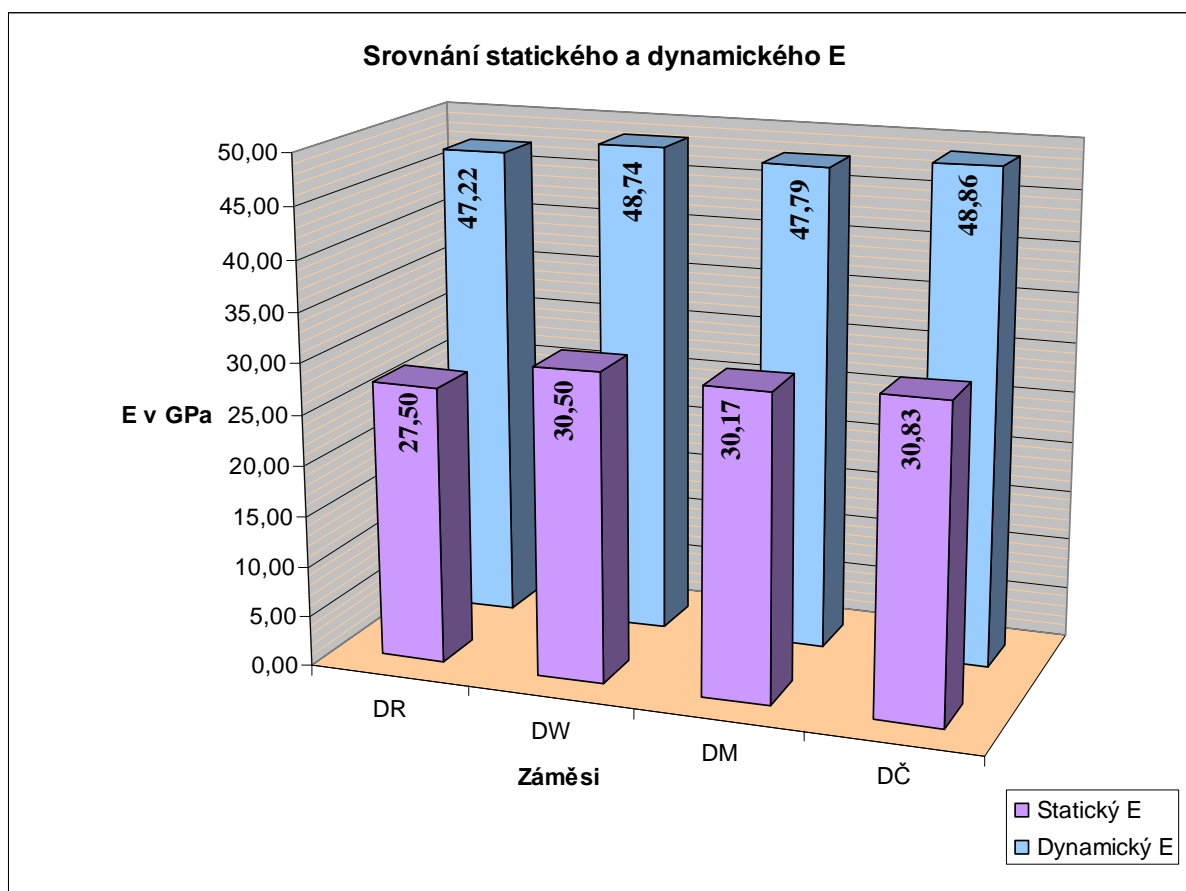
Obrázek 10.2.2 Porušení válce při zkoušce pevnosti v tlaku

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERSITA OSTRAVA						
STAVEBNÍ FAKULTA						
L. Poděště 1875, 708 00 Ostrava - Poruba						
ZKUŠEBNÍ LABORATOŘ STAVEBNÍCH HMOT						
Zkoušku provedla: DENISA GRACOVÁ				Datum: 21.4.2010		
t: 23,6 °C		w: 34,4 %				
Stanovení statického modulu pružnosti betonu						
Číslo vzorku	$\sigma_a$ ( MPa )	$\sigma_b$ ( MPa )	$\varepsilon_a$ ( mm )	$\varepsilon_b$ ( mm )	E ( MPa )	E
DR5	18,00	0,50	0,0970	0,0070	27,50	27,50
DR6	18,00	0,50	0,0930	0,0050	28,00	
DR7	18,00	0,50	0,0990	0,0090	27,00	
DW5	19,50	0,50	0,0920	0,0040	30,50	30,50
DW6	19,50	0,50	0,0910	0,0040	30,50	
DW7	19,50	0,50	0,0900	0,0040	30,50	
DM5	18,50	0,50	0,0890	0,0050	30,00	30,17
DM6	18,50	0,50	0,0870	0,0050	31,00	
DM7	18,50	0,50	0,0910	0,0060	29,50	
DČ5	18,50	0,50	0,0860	0,0040	30,50	30,83
DČ6	18,50	0,50	0,0850	0,0050	31,50	
DČ7	18,50	0,50	0,0850	0,0020	30,50	

Tabulka 10.2.1 – Statický modul pružnosti betonu v tlaku



Graf g – Závislost statického modulu pružnosti na složení betonu

10.3 Srovnání statického a dynamického modulu pružnosti**Graf h – Srovnání statického a dynamického modulu pružnosti**

## 11. Závěr

Úkolem bakalářské práce bylo zjištění vlivu složení betonu na jeho modul pružnosti. Konkrétně se jednalo o použití moravské droby a navržení betonové směsi, tak aby bylo dosaženo co nejvyššího modulu pružnosti.

Pro experimentální část byla navržena třída betonu C 30/37. Ze zkoušek pevnosti betonu v tlaku vyplývá, že bylo dosaženo třídy betonu C 50/60. Dle normy ČSN EN 1992-2 – Eurokód 2 by tyto betony měly dosahovat modulu pružnosti 37 GPa.

Pro zjištění modulu pružnosti byly provedeny dva druhy zkoušek. Nedestruktivní zkouška, pro zjištění dynamického modulu pružnosti a destruktivní zkouška, pro zjištění statického modulu pružnosti. Ze zkoušek vyplývá, že hodnoty dynamického modulu pružnosti  $E_{BU}$  jsou vyšší o 15-20 GPa, než jsou hodnoty statického modulu pružnosti  $E_C$ .

Obě metody prokázaly následující. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti, jak statického, tak i dynamického, bylo dosaženo přidáním 50% čediče frakce 8-16 místo moravské droby frakce 8-16. Díky snížení vodního součinitele oproti referenční záměsi bylo dosaženo, také vyšších hodnot modulu pružnosti, jak statického, tak i dynamického. Nejmenší vliv na modul pružnosti mělo přidání mikrosiliky do záměsi. Výsledky jsou uvedeny v tabulce ( tab. 11.1 ).

Záměs	$E_{BU}$ ( GPa)	$E_C$ ( GPa)	$f_{ck}$ ( MPa)
Referenční	47,22	27,50	65,44
Se sníženým w	48,74	30,50	72,67
S mikrosilikou	47,79	30,17	67,31
S přidáním čediče	48,86	30,83	67,97

Tabulka 11.1 – Shrnutí výsledků

Při laboratorním postupu prací byla provedena fotodokumentace, která je k dispozici na přiloženém CD disku.

## **Seznam použité literatury**

- [ 1 ] Petr Pytlík: Technologie betonu
- [ 2 ] Prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc., Prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc., Doc. Ing. Jiří Krátký, CSc., Doc. Ing. Alena Kohoutková, CSc., Ing. Jitka Vašková, CSc. : Navrhování betonových konstrukcí I.
- [ 3 ] ČSN ISO 6784 - Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [ 4 ] ČSN 73 1371 – Ultrazvuková impulzová metoda
- [ 5 ] ČSN EN 1992 – 2 – Eurokód 2 – Navrhování betonových konstrukcí
- [ 6 ] ČSN EN 206 -1 – Beton

## **Internetové odkazy**

- [ 7 ] Technický list: [http://www.basf-cc.cz/cs/produkty/prisadydobetonu/plastifikacniasuperplastifikacniprisady/superplastifikacniprisadynabaziPCE/glenium110/Documents/tl\\_glenium%20110.pdf](http://www.basf-cc.cz/cs/produkty/prisadydobetonu/plastifikacniasuperplastifikacniprisady/superplastifikacniprisadynabaziPCE/glenium110/Documents/tl_glenium%20110.pdf)
- [ 8 ] Technický list: <http://www.basf-cc.cz/cs/produkty/prisadydobetonu/plastifikacniasuperplastifikacniprisady/superplastifikacniprisadynabaziPCE/gleniumace430/Documents/tl%20glenium%20ace%20430.pdf>
- [ 9 ] Webové stránky:  
<http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Literatura/laboratore.pdf>
- [ 10 ] Webové stránky:  
<http://www.stavebnitechnologie.cz/view.php?cisloclanku=2002032804>

**Seznam obrázků**

Obr. 3.1.1	- Mdroba frakce 8-16	14
Obr. 3.1.2	- Mdroba frakce 4-8	14
Obr. 3.2.1	- Čedič frakce 8-16	15
Obr. 3.3.1	- Tovačov frakce 0-4	15
Obr. 3.4.1	- Pyknometr	16
Obr. 3.5.1	- Sítovací zařízení	20
Obr. 8.3.1	- Setřásací stolek, dusadlo a forma	33
Obr. 8.4.1	- Nádoba s nástavce pro měření obsahu vzduchu v čerstvém betonu	34
Obr. 9.1	- Porušení vzorku v lisu	37
Obr. 9.2	- Porušení referenčních vzorků	37
Obr. 9.3	- Porušení vzorků se sníženým vodním součinitelem	37
Obr. 9.4	- Porušení vzorků s mikrosilikou	38
Obr. 9.5	- Porušení vzorků s čedičem	38
Obr. 10.1.1	- Měření dynamického modulu pružnosti	43
Obr. 10.1.2	- Displej UZ měřícího přístroje	43
Obr. 10.2.1	- Měření statického modulu pružnosti	50
Obr. 10.2.2	- Porušení válce při zkoušce pevnosti v tlaku	50

**Seznam grafů**

Graf a	Křivka zrnitosti kameniva – Tovačov frakce 0-4	21
Graf b	Křivka zrnitosti kameniva – Mdroba frakce 4 -8	22
Graf c	Křivka zrnitosti kameniva Mdroba frakce 8 – 16	23
Graf d	Křivka zrnitosti kameniva Čedič frakce 8 – 16	24
Graf e	Závislost pevnosti betonu v tlaku na složení betonu	41
Graf f	Závislost dynamického modulu pružnosti na složení betonu	48
Graf g	Závislost statického modulu pružnosti na složení betonu	51
Graf h	Srovnání statického a dynamického modulu pružnosti	52

## **Seznam tabulek**

Tab. 3.4.1	Nejmenší hmotnost dílčích navážek	17
Tab. 3.4.2	Stanovení objemové hmotnosti kameniva	18
Tab. 3.5.1	Hmotnost zkušebních navážek pro hutné kamenivo	19
Tab. 3.5.2	Sítový rozbor kameniva – Tovačov frakce 0-4	21
Tab. 3.5.3	Sítový rozbor kameniva – Mdroba frakce 4-8	22
Tab. 3.5.4	Sítový rozbor kameniva – Mdroba frakce 8-16	23
Tab. 3.5.5	Sítový rozbor kameniva – Čedič frakce 8-16	24
Tab. 8.1.1	Receptura	30
Tab. 8.1.2	Receptura	31
Tab. 8.3.1	Klasifikace podle rozlití	33
Tab. 8.3.2	Stanovení konzistence čerstvého betonu – rozlitím	33
Tab. 8.4.1	Stanovení obsahu vzduchu v čerstvém betonu a objemová hmotnost	35
Tab. 9.1	Krychelná pevnost betonu v tlaku po 1 dni	38
Tab. 9.2	Krychelná pevnost betonu v tlaku po 28 dnech	39
Tab. 9.3	Válcová pevnost betonu v tlaku po 28 dnech	40
Tab. 10.1.1	Dynamický modul pružnosti betonu měřený na krychlích	44
Tab. 10.1.2	Dynamický modul pružnosti betonu měřený na krychlích	45
Tab. 10.1.3	Dynamický modul pružnosti betonu měřený na válcích	46
Tab. 10.1.4	Dynamický modul pružnosti betonu měřený na válcích	47
Tab. 10.2.1	Statický modul pružnosti betonu v tlaku	51
Tab. 11.1	Shrnutí výsledků	53